

This Page Is Inserted by IFW Operations
and is not a part of the Official Record

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

**As rescanning documents *will not* correct images,
please do not report the images to the
Image Problems Mailbox.**

THIS PAGE BLANK (USPTO)



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ Patentschrift
⑩ DE 197 02 593 C 2

⑤1 Int. Cl.7:
B 06 B 1/02
A 61 B 17/22

②1 Aktenzeichen: 197 02 593.5-22
②2 Anmeldetag: 24. 1. 1997
④3 Offenlegungstag: 30. 7. 1998
④5 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 6. 7. 2000

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

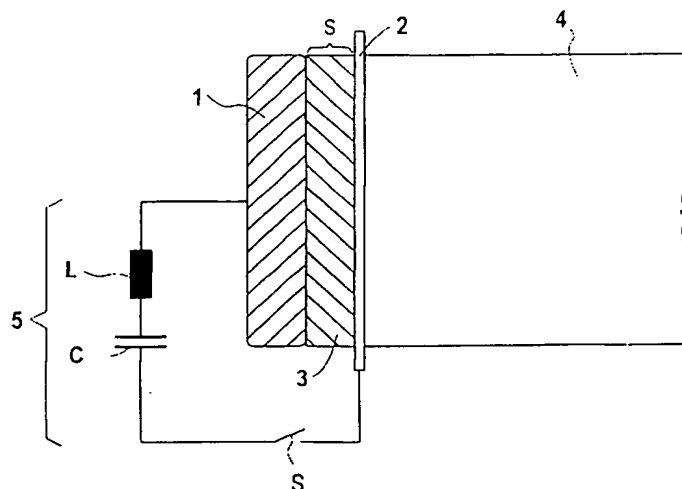
⑦3 Patentinhaber:
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦2 Erfinder:
Hartmann, Werner, Dipl.-Phys. Dr., 91091
Großenseebach, DE; Kieser, Jörg, Dipl.-Phys. Dr.,
91301 Forchheim, DE

⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:
DE-AS 10 76 413

⑤4 Verfahren und Vorrichtung zur Erzeugung von Stoßwellen für technische, vorzugsweise medizintechnische Anwendungen

⑤7 Verfahren zur Erzeugung von Stoßwellen für technische, vorzugsweise medizintechnische, Anwendungen, insbesondere für die Lithotripsie und/oder die Schmerztherapie, wobei durch Druckpulsationen akustische Wellen vorgegebener Wellenlänge hoher Energiedichte erzeugt werden, wozu mit Hilfe eines intensiven elektrischen Impulses elektrische Energie in einem flüssigen Elektrolyten direkt und weitestgehend verlustfrei in mechanische Energie in Form von Druckpulsationen gewandelt wird, dadurch gekennzeichnet, daß die elektrische Energie zur Aufheizung des leitfähigen, flüssigen Elektrolyten eingesetzt wird und somit die Druckpulsationen über eine kurzzeitige Aufheizung des Elektrolyten erzeugt werden, wobei die kurzzeitige Aufheizung als homogene Aufheizung in einer großflächigen und dünnen Flüssigkeitsschicht des Elektrolyten erfolgt.



DE 197 02 593 C 2

DE 197 02 593 C 2

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Erzeugung von Stoßwellen für technische, vorzugsweise medizinische Anwendungen, insbesondere für die Lithotripsie und/oder Schmerztherapie, wobei durch Druckpulsationen akustische Wellen vorgegebener Wellenlänge hoher Energiedichte erzeugt werden, wozu mit Hilfe eines intensiven elektrischen Impulses elektrische Energie in einem flüssigen Elektrolyten direkt und weitestgehend verlustfrei in mechanische Energie in Form von Druckpulsationen gewandelt wird. Daneben bezieht sich die Erfindung auf eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

Für verschiedene technische Anwendungen werden bereits intensive Schallwellen oder Stoßwellen eingesetzt, deren Arbeitsdrücke im Bereich einiger 10^7 Pa bis zu 10^8 Pa liegen. Ein Beispiel ist die Lithotripsie in der Medizintechnik, bei der durch extrakorporal erzeugte, fokussierte Druckwellen am Ort von Gallen- oder Nierensteinen eine so starke Stoßwelle erzeugt wird, daß der Stein in kleine Fragmente zerfällt, welche ohne operative Maßnahmen auf natürliche Weise den Körper verlassen können. Für eine ausreichend hohe Fragmentation des Steins sind dazu typischerweise einige 100 bis einige 1000 Stoßwellenanwendungen, d. h. Einzelpulse, erforderlich.

Zur Erzeugung letzterer Stoßwellen benötigt man einen Stoßwellengenerator, der eine bereits fokussierte oder durch insbesondere akustische Linsen fokussierbare Schallwelle erzeugt, deren Fokus am Ort des zu zerstörenden Steins liegen muß. Die Brennweite der akustischen Anordnung sollte dabei klein, d. h. im Bereich einiger 10 cm sein, um die Energiedichte an der Körperoberfläche des Patienten soweit, d. h. auf $< 1 \text{ J/cm}^2$ zu begrenzen, daß der beim Schalldurchtritt entstehende Schmerz durch Lokalanästhetika beherrschbar ist.

Für eine vertretbare Behandlungsdauer sollte die Pulswiederholrate bei etwa 1 bis 5 pro Sekunde liegen. Die Lebensdauer des Stoßwellengenerators muß möglichst hoch, d. h. bei einigen Millionen Pulsen, liegen, um die Behandlung einer größeren Anzahl an Patienten ohne notwendige Service- bzw. Reparaturarbeiten zu ermöglichen. Während der gesamten Lebensdauer dürfen sich die Eigenschaften des Stoßwellengenerators, insbesondere Stoßwellenenergie, Impulsdauer, Fokusslage, etc., nicht oder nur geringfügig ändern, um konstante, reproduzierbare Arbeitsergebnisse zu ermöglichen. Die Erzeugung der Stoßwellen sollte in Wasser oder in Flüssigkeiten mit akustisch dem Wasser vergleichbaren Eigenschaften erfolgen, damit eine effiziente Schallausbreitung und -übertragung in den Körper des Patienten über eine angepaßte akustische Impedanz zwischen Stoßwellengenerator und Körper möglich wird. Der Fokussdurchmesser der fokussierten Stoßwelle am Ort des Steins ($\sim \text{cm}$) sollte vergleichbar sein mit den Abmessungen des Steins, um eine effiziente Wechselwirkung zwischen Stoßwelle und Stein zu erreichen. Typische Wellenlängen der Stoßwelle liegen im Bereich von 1 bis 10 mm, entsprechend Pulsdauern von typischerweise $\sim 1 \mu\text{s}$. Entsprechend hoch sind die Anforderungen an die Qualität der Wellenfront im Stoßwellengenerator, um die geforderte Fokussierbarkeit zu erzielen.

Ähnliche Anforderungen werden auch bei anderen technischen Anwendungen erhoben, so z. B. beim Recycling durch Stoßwellen, beim Reinigen von Oberflächen durch Stoßwellen, im Bergbau, beispielsweise Felszerkleinerung ohne Einsatz chemischer Sprengmittel, in der Geologie und der Meereskunde, beispielsweise für Sonaranwendungen. Dabei werden zum Teil wesentlich höhere und u. U. auch variablere Pulsenergien gefordert als bei der Lithotripsie, so daß für viele Anwendungen ein nahezu beliebig skalierbares Stoßwellengenerator im Prinzip von großem Nutzen wäre.

Zur Erzeugung von Stoßwellen werden, abgesehen vom Einsatz chemischer Explosivstoffe, bisher ausschließlich die folgenden drei Prinzipien eingesetzt, bei denen elektrische Energie in akustische Energie in Form intensiver Stoßwellen umgesetzt wird:

- Das elektrohydraulische Prinzip mit Erzeugung einer sphärisch expandierenden Druckwelle durch einen Unterwasserfunken, und gegebenenfalls Fokussierung mit ellipsoidischen Reflektoren, wozu Ausführungen in Rev. Sc. Instrument 65 (1994), S. 2356-2363 und Biomed. Tech. 22 (1977), S. 164 ff. gemacht werden.
- Das piezoelektrische Prinzip mit Erzeugung einer Druckwelle durch Einsatz gepulst betriebener piezoelektrischer Schallwandler, beispielsweise gemäß der DE 33 19 871 A1.
- Das elektromagnetische Prinzip mit Erzeugung einer Druckwelle durch eine elektromagnetisch angetriebene Membran, was im einzelnen in Appl. Phys. Lett. 64 (1994), S. 2596-2598 und Acustica 14 (1964), S. 187 beschrieben ist.

Weiterhin ist aus der DE-AS 10 76 413 eine Stoß-Schallquelle mit wenigstens einem innerhalb einer Flüssigkeit befindlichen, durch Isolierkörper eingegengten Strompfad bekannt, bei dem als Stromquelle ein Entladungskondensator dient und die die Einengung der Strompfade bewirkende Körper aus gummielastischem Werkstoff großer Zähigkeit bestehen. Über die physikalische und/oder die phänomenologische Wirkungsweise der dort zugrunde liegenden Pulsationserzeugung werden keine eindeutigen Aussagen gemacht.

Insbesondere beim erstgenannten Prinzip sind Hauptnachteile die kurze Lebensdauer, schlechte Reproduzierbarkeit und begrenzte Skalierbarkeit der Stoßwellenwandler, wobei vor allem die kurze Lebensdauer, z. B. nur einige 1000 Pulse, aufgrund des Elektrodenabbrandes sowie die daraus resultierende Schwankung der Fokusslage Probleme bereiten. Piezoelektrische Wandler sind bei den hier geforderten Amplituden in ihrer mechanischen Lebensdauer ebenfalls stark eingeschränkt. Elektromagnetische Schallwandler erreichen z. Z. die größten Lebensdauern von typisch ~ 1 Million Pulse, sind jedoch aus Gründen elektrischer und mechanischer Belastbarkeit nur begrenzt skalierbar. Eine Verlängerung der Lebensdauer auf mehrere Millionen Pulse wäre vorteilhaft, wie auch eine breitere Skalierbarkeit der Schallwellenenergie und Impulsform.

Aufgabe der Erfindung ist es daher, ein Verfahren zur Erzeugung von Stoßwellen anzugeben, mit dem ohne Verschleißprobleme mehrere Millionen Pulse erzeugt werden können, und dazu eine zugehörige Vorrichtung zu schaffen.

Die Aufgabe ist erfindungsgemäß durch die Gesamtheit der Merkmale des Verfahrensanspruches 1 und des zugehörigen Vorrichtungsanspruches 7 gelöst. Weiterbildungen sind in den Unteransprüchen gekennzeichnet.

Die Erfindung geht davon aus, daß über die kurzzeitige Aufheizung eines gut leitfähigen Elektrolyten mit Hilfe eines intensiven elektrischen Impulses die elektrische Energie direkt und verlustfrei in thermische Energie des Elektrolyten

umgesetzt werden kann. Die Aufheizung erfaßt größere, skalierbare Volumina bzw. große, ebenfalls skalierbare Oberflächen simultan und homogen. Über die Wärmeausdehnung des erwärmten Elektrolyten wird in geeignetem Umgebungsmedium ein Druckanstieg und damit, unter geeigneten Randbedingungen, eine Druckwelle erzeugt, die sich in diesem Medium ausbreiten kann. Aufgrund dieses Prinzips ist eine nahezu beliebige Skalierbarkeit und Geometrie möglich bei gleichzeitig nahezu verschleißfreiem Verhalten eines solchen thermohydraulischen Stoßwellenwandlers. Da im Gegensatz zu dem elektrohydraulischen Prinzip generell keine Konzentration des Stromflusses durch Plasmabildung an einzelnen Punkten der Elektroden erfolgt, führt der Betrieb einer solchen Anordnung nicht zum Abbrand der Elektroden, wodurch eine hohe Lebensdauer erreichbar ist. Durch die räumlich homogene Leistungsbelastung des Elektrolyten wird auch die Membran bzw. akustisch "durchlässige" Elektrode mechanisch sehr homogen belastet, wodurch die Lebensdauer der Membran ebenfalls stark erhöht wird im Vergleich zu elektromagnetischen Schallwandlern.

Weitere Einzelheiten und Vorteile der Erfindung ergeben sich aus der nachfolgenden Figurenbeschreibung von Ausführungsbeispielen anhand der Zeichnung, die die Arbeitsweise von erfindungsgemäßen thermoelektrischen Schallwandlern wiedergeben. Es zeigen jeweils in schematischer Darstellung

Fig. 1 einen thermoelektrischen Stoßwellengenerator mit ebenen Elektroden und zugehörigem Leistungsimpuls-generator,

Fig. 2 einen rotationssymmetrischen thermohydraulischen Stoßwellengenerator und zugehörigem Leistungsimpuls-generator mit einer radialen Elektrodenanordnung und radialem Stromfluß,

Fig. 3 einen thermohydraulischen Stoßwellengenerator mit konkaven Elektroden, sowie

Fig. 4 und 5 eine Draufsicht und einen Schnitt einer spezifischen Ausbildung einer fokussierenden Elektrode.

Fig. 1 zeigt das Prinzip der Ausführungsform eines thermoelektrischen Schallwandlers mit ebenen Elektroden. Bei einer solchen Ausführungsform wird, entsprechend der Geometrie der Anordnung, eine ebene Schallwelle erzeugt, die von einer gegebenenfalls nachfolgenden akustischen Linse fokussiert werden kann. Der Schallwandler besteht aus einer feststehenden, massiven Elektrode 1, einer dünnen und leichten Elektrode 2 im Abstand s von der Elektrode 1, dem Elektrolyten 3 der Schichtdicke s , und dem Schallausbreitungsmedium 4.

Die feststehende Elektrode 1 und die membranförmige Elektrode 2 sind beide aus gegenüber den Medien 3 und 4 korrosionsbeständigen Materialien gefertigt und weisen glatte Oberflächen auf, um die Ausbildung lokalisierter Entladungen aufgrund von Feldstärkeüberhöhungen an Spitzen etc. zu vermeiden.

Das Produkt aus Massendichte und Schallgeschwindigkeit der Elektrode 1 ist deutlich größer als die im Elektrolyten 3 und dem Schallausbreitungsmedium 4. Die akustische Impedanz des Elektrolyten 3 und des Schallausbreitungsmediums 4 sollen möglichst gleich sein und etwa der von Wasser, d. h. dem Hauptbestandteil des menschlichen Körpers, entsprechen, um eine gute akustische Anpassung zwischen dem Schallwandler und dem Patientenkörper zu erzielen. Zweckmäßigerweise wird als Medium 4 gasfreies, vollentsalztes Wasser und als Elektrolyt 3 eine leitfähige Salzlösung verwendet.

Eine besonders einfache Ausführungsform verwendet für das Medium 4 dasselbe Material wie für den Elektrolyten 3. Es sind dazu auch andere Flüssigkeiten als Wasser, aber mit vergleichbaren elektrischen und akustischen Eigenschaften, verwendbar. Insbesondere bei anderen Anwendungen als in Lithotriptern ist es sinnvoll, die akustische Impedanz der Medien 3 und 4 an die des Koppelmediums anzupassen, wie beispielsweise bei der Felszerkleinerung mittels Stoßwellen.

Die Stromzuführung zur Elektrode 2 muß symmetrisch aufgebaut sein, um die gewünschte Symmetrie der zu erzeugenden Druckwelle über eine symmetrische Strom- und Leistungsverteilung im Elektrolyten 3 zu erreichen. Vorteilhaft ist dazu die Beibehaltung einer coaxialen Stromzuführung bis zu den Elektroden 1 und 2.

An die Elektroden 1 und 2 angeschlossen ist ein Leistungsimpulsgenerator, der elektrische Energie in Form kurzer Pulse mit Zeitdauern von typisch μs bereitstellt. Im einfachsten Fall besteht der Impulsgenerator aus einem Energiespeicher in Form eines Hochspannungskondensators C , einem schnell schließenden Schaltelement S , und einer aus den Zuleitungen gebildeten Induktivität L . Beim Schließen des Schalters S entlädt sich der Kondensator über die Induktivität L und den Schalter S in den Elektrolyten mit dem Innenwiderstand R . Der Energieinhalt E des Speichers ist

$$E = C \cdot U^2/2$$

mit der Ladespannung U des Kondensators. Dadurch wird der Elektrolyt um die Temperaturdifferenz

$$\Delta T = E/(\rho_m \cdot C_h \cdot A \cdot s)$$

erwärmt, wobei ρ_m die Massendichte des Elektrolyten ($\sim 1,0 \text{ g/cm}^3$ für wässrige Lösungen), C_h die Wärmekapazität des Elektrolyten, und $A \cdot s$ das Volumen des Elektrolyten (= Fläche A · Dicke s) ist. Bei ausreichend kurzen Impulsen im μs -Bereich kann die Wärmeleitung vernachlässigt werden. Dadurch dehnt sich der Elektrolyt um

$$\Delta V/V = \alpha \cdot \Delta T$$

aus, wobei α der Volumenausdehnungskoeffizient ist. Für den Fall, daß gilt

$$r \gg s$$

$$\text{und } s < \lambda, r > \lambda$$

mit $2 \cdot r$ = Durchmesser der Elektroden 1 und 2, λ = Länge der Stoßwelle, $\lambda = c_s \cdot \tau$ mit c_s = Schallgeschwindigkeit in den Medien 3 und 4 und τ = Pulsdauer, dehnt sich der Elektrolyt fast ausschließlich in der Richtung senkrecht zur Elektrodenoberfläche aus, d. h. für die relative Schichtdickenänderung erhält man

$$\Delta s/s \sim \Delta V/V = \alpha \cdot \Delta T$$

Diese Änderung von s wird wegen der endlichen Schallgeschwindigkeit c_s über einen Weg

$$\lambda' = s + \lambda$$

aufgrund der endlichen Kompressibilität κ der Medien 3 und 4 abgebaut. Wenn κ und c_s für beide Medien 3 und 4 als identisch angenommen werden, erhält man für den mittleren Druckanstieg innerhalb des Bereichs λ' :

$$\Delta p = \alpha \cdot E / [(s + \lambda) \cdot \kappa \cdot \rho_m \cdot C_h \cdot A]$$

und für den Fall $s \ll \lambda$, d. h. im Fall vernachlässigbarer Schichtdicke s im Vergleich zur Stoßwellenbreite λ :

$$\Delta p = \alpha \cdot E / [c_s \cdot \tau \cdot \kappa \cdot \rho_m \cdot C_h \cdot A]$$

D. h., die Amplitude des Druckanstiegs ist unabhängig von der Schichtdicke s .

Für α , c_s , κ , ρ , und C_h lassen sich, bei Verwendung einer wässrigen Lösung oder Ethanol für die Medien 3 und 4, die Werte aus der Literatur entnehmen:

Symbol	Parameter	Wasser	Ethanol	Einheit
α	Volumenausdehnungskoeffizient	$2,07 \cdot 10^{-4}$	$11 \cdot 10^{-4}$	1/K
c_s	Schallgeschwindigkeit	1480	1170	m/s
κ	Kompressibilität	$0,5 \cdot 10^{-9}$	$1,17 \cdot 10^{-9}$	1/Pa
ρ_m	Massendichte	10^3	789	kg/m ³
C_h	Wärmekapazität	$4,18 \cdot 10^3$	$2,43 \cdot 10^3$	J/kg

Bei einer Pulsenergie von 200 J, einer Elektrodenoberfläche $A = 100 \text{ cm}^2 = 10^{-2} \text{ m}^2$ und einer Pulsdauer von $\tau \sim 5 \mu\text{s}$ erzielt man somit eine ebene Druckwelle mit einer mittleren Amplitude von

$$\Delta p \sim 2,66 \cdot 10^5 \text{ N/m}^2 \sim 2,6 \text{ bar}$$

in wässrigen Elektrolyten, bzw.

$$\Delta p \sim 1,6 \cdot 10^6 \text{ N/m}^2 \sim 16 \text{ bar}$$

in einem Elektrolyten, der als Hauptbestandteil Ethanol enthält.

Dieser Druckanstieg breitet sich im Medium 4 als ebene Welle senkrecht zur Oberfläche der Elektrode 1 aus und kann von einer akustischen Linse fokussiert werden; dabei werden Fokussdurchmesser $2 \cdot r_f$ von typisch

$$2 \cdot r_f \sim \lambda$$

erreicht, d. h. die ebene Welle wird um ein bis zwei Größenordnungen komprimiert, was zu einer entsprechenden Druck-erhöhung im Fokus führt.

Über eine Vergrößerung von A lassen sich die im Fokus erzielbaren Spitzendrucke in weiten Grenzen skalieren. Mit Hilfe der beschriebenen Anordnung ist es somit möglich, reproduzierbar und praktisch verschleißfrei Stoßwellen mit Amplituden im $> 100 \text{ bar}$ -Bereich zu erzeugen, welche für die Anwendung in Lithotriptern geeignet sind.

Eine weitere Erhöhung des Drucks erhält man durch eine Verkürzung der Pulsdauer, da wegen der endlichen Schallgeschwindigkeit die im Elektrolyten deponierte Energie auf ein kleineres Volumen verteilt und der Druckanstieg dementsprechend über eine kürzere Strecke abgebaut wird. Bei gleicher Pulsenergie von 200 J und einer Pulsdauer von nur $\tau = 1 \mu\text{s}$ steigt der Anfangsdruck bereits auf $\Delta p \sim 10 \text{ bar}$ bei Verwendung eines wässrigen Elektrolyten.

Eine zusätzliche Erhöhung des Drucks läßt sich über Verwendung anderer Elektrolyten für Medium 3 erreichen; insbesondere sind Flüssigkeiten mit niedriger Wärmekapazität und kleiner Kompressibilität bei gleichzeitig großem Wärmeausdehnungskoeffizienten vorteilhaft. Als Beispiel sei hier der oben bereits genannte Ethanol genannt, dem ionenleitende Zusätze beigemischt werden; als Zusatz ist beispielsweise eine Beimischung aus Wasser mit einem darin gelösten Salz geeignet, um die geforderte Leitfähigkeit zu erreichen. Für das oben angegebene Beispiel ($E = 200 \text{ J}$; $\tau = 1 \mu\text{s}$) erhält man Drücke der Größenordnung $\Delta p \sim 40 \text{ bar}$ bei Verwendung von Ethanol. Besonders vorteilhaft ist die Verwendung höherwertiger, bei Raumtemperatur nicht entflammbarer Alkohole, wie beispielsweise Ethylenglycol oder Glycerin mit darin löslichen Salzen wie z. B. Magnesiumperchlorat oder Lithiumchlorid.

Gemäß Fig. 2 verwendet eine vorteilhafte Ausführung eine Elektrodenanordnung mit Stromfluß in radialer anstatt axialer Richtung und läßt somit höhere Betriebsspannungen am Elektrolyten 3 zu. Der Leistungsimpuls wird an eine in der Symmetrieachse zentrische Elektrode 8 und eine dazu coaxial angeordnete, zylindrische oder ringförmige Elektrode 7 angelegt. Der Strom fließt im angegebenen Beispiel, bei dem Rotationssymmetrie vorausgesetzt wird, in radialer Richtung zwischen den Elektroden 7 und 8 im Elektrolyten 3. Der Elektrolyt mit der Schichtdicke s ist auf der einen Seite durch eine isolierende Platte 9 abgegrenzt, auf der anderen Seite durch eine ebenfalls isolierende Membran 10 gegen das

Ausbreitungsmedium 4, um den Stromfluß dadurch auf das Volumen mit der Elektrolytdicke s zu begrenzen. Die Elektrodenschlagweite s' wird dadurch von s auf annähernd den Radius der Anordnung erweitert, wodurch wesentlich höhere Spannungen an den Elektroden zulässig werden, ohne daß die Gefahr eines Durchschlags im Elektrolyten entsteht. Dadurch kann im Elektrolyten 3 eine wesentlich höhere Energiedichte erzeugt werden, die zu erheblich höheren Druckamplituden führt als im Fall axialen Stromflusses.

Eine Fokussierung der Druckwelle wird in vorteilhafter Weise dadurch erreicht, daß zwei Elektroden 21 und 22 nicht eben, sondern entsprechend Fig. 3 konkav ausgebildet sind. Es wird so eine gekrümmte Wellenfront erzeugt, die zu einer konzentrisch einlaufenden Druckwelle führt, welche einen ausgeprägten Fokus im Brennpunkt des von der Elektrodenoberfläche der Elektrode 21 gebildeten Reflektors aufweist. In dieser selbstfokussierenden Anordnung kann auf eine akustische Linse verzichtet werden, so daß die mit der Linse verbundenen Abbildungsfehler und Verluste entfallen.

Eine Ausbildung der Elektroden 21 und 22 in konvexer Form würde zur Ausbildung von sphärisch expandierenden Stoßwellen führen, die z. B. für Ultraschall-Tomographie sowie für Sonar-Systeme im Wasser und in der Erdkruste, dem sogenannten "Geo-Mapping", eingesetzt werden können.

In weiteren vorteilhaften, nicht im einzelnen gezeigten Ausführungsformen kann die Geometrie der Elektroden 1 und 2 eine andere als ebene oder sphärische Geometrie aufweisen. Bei Verwendung zylindrischer Elektrodenformen läßt sich beispielsweise ein Linienfokus erzeugen, der vorteilhaft zum präzisen Trennen spröder Objekte, wie beispielsweise Halbleiterscheiben, Glaswerkstücke, Keramiksubstrate, optische Bauteile, Keramikfliesen, etc., oder zum Reinigen größerer Gußteile einsetzen läßt. Durch Anpassung von Geometrie und elektrischen Parametern läßt sich ein thermohydraulischer Stoßwellengenerator für nahezu jede Anwendung optimieren, bei der hohe mechanische Kräfte nur kurzzeitig, d. h. stoßartig, benötigt werden.

Für die Dimensionierung des Stoßwellengenerators ist die Kopplung mit dem Impulsgenerator ausschlaggebend. Bei einer für die Leistungsimpulstechnik typischen Impedanz Z von $Z = \sqrt{L/C} \sim 1 \Omega$ benötigt man einen Innenwiderstand des Elektrolyten von $R \sim 1 \Omega$. Der Innenwiderstand R des Elektrolyten berechnet sich zu $R = \rho \cdot s/A$ und daraus der spezifische Widerstand ρ zu $\rho = A \cdot R/s = 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$.

Ein entsprechender spezifischer Widerstand wird beispielsweise durch wäßrige Salzlösungen mit Konzentrationen im Bereich $C \sim 1 \text{ g/l}$ erreicht, wenn die Oberfläche A im Bereich $A \sim 100 \text{ cm}^2$ und der Elektrodenabstand s mit $s \approx 1 \text{ mm}$ dimensioniert werden.

Bei einem Elektrodenabstand von $s = 1 \text{ mm}$ erreicht man eine Spannungsfestigkeit U_{max} in Wasser von $U_{\text{max}} \sim 10 \text{ kV}$. Dies entspricht der maximal und nur kurzzeitig am Elektrolyten anliegenden Spitzenspannung bei einer Ladespannung von 20 kV . Die Dimensionierung von Stoßwellengenerator und Leistungsimpulsgenerator entsprechen somit dem bei ähnlichen Geräten eingesetzten Stand der Technik und stellen keine schwer beherrschbaren Anforderungen an die Komponenten.

In weiterer Ausgestaltung kann beim beschriebenen "Thermohydraulischen Stoßwellengenerator" sowohl auf eine konkave Formgebung der Elektroden als auch auf eine refraktive akustische Linse verzichtet werden. Dies kann dadurch erreicht werden, daß die Oberfläche einer akustisch reflektierenden ("harten") Elektrode so strukturiert ist, daß im Mittel eine plane oder konkave, fokussierende Oberfläche innerhalb zulässiger Toleranzen eingehalten wird, daß aber durch radialsymmetrische Strukturen jedoch eine Fokussierung ringförmiger Anteile der reflektierten ebenen Schallwelle auf einen gemeinsamen Fokus erfolgt. Die Strukturen müssen dabei in radialer Richtung so klein dimensioniert sein, daß sowohl die unvermeidlichen Abweichungen von der angestrebten gemeinsamen Fokusslage toleriert werden können, als auch die Spannungsfestigkeit zwischen den beiden Elektroden durch die ebenfalls unvermeidlichen Höhendifferenzen der Oberflächenstrukturen nicht beeinträchtigt wird.

Gemäß Fig. 4 und Fig. 5 erreicht man den gewünschten Effekt, indem in eine Elektrodenoberfläche 100 konzentrische Ringe 11 eingedreht werden, deren Oberfläche 111 mit der ursprünglich planen Elektrodenoberfläche einen bestimmten Winkel α einschließen, so daß die Ringoberflächen 111 zur Symmetrieachse der Elektrode hin geneigt sind. Dieser Winkel α wird so berechnet, daß die Normalenkegel durch die jeweilige Ringmitte mit ihrer Spitze alle im geforderten Fokuspunkt liegen. Dafür gilt die Beziehung

$$\sin \alpha = R_x / F$$

wobei R_x der mittlere Radius des x -ten Ringes und F der Abstand des Fokus von der Elektrodenoberfläche ist. Die Ringbreite wird vorteilhaft so gewählt, daß die maximalen Höhen der Ringe über der mittleren, d. h. planen Elektrodenoberfläche $< 0,25 \cdot d$ sind, wobei d der mittlere Elektrodenabstand ist. Dadurch wird die Spannungsfestigkeit der Anordnung nicht unzulässig erniedrigt. Eine zusätzliche Anforderung an die Ringbreite wird durch die zulässigen Abweichungen der Lage der Teilfokii vom gemeinsamen Fokus und der damit verbundenen Verbreiterung des Fokusbereichs erhoben.

Eine vorteilhafte Ausführung verwendet für die Oberflächen der eingedrehten Ringe keine Kegelmantelflächen als einfachste Ausführungsform, sondern Kugeloberflächen, deren Radien r_x so berechnet sind, daß eine Feinkorrektur der Wellenfront in Bezug auf die geforderte Fokusslage erfolgt:

$$r_x = F / \sin \alpha$$

Durch weitere Feinkorrekturen der beschriebenen Art lassen sich die nichtlinearen Effekte, die durch die Aufteilung der Druckwelle zu einer intensiven Stoßwelle hervorgerufen werden, ebenfalls korrigieren, so daß mit einer quasiplanaren Anordnung mit strukturierter Oberfläche eine fokussierende Anordnung mit hervorragender Fokusqualität erzeugt werden kann.

Die im einzelnen beschriebenen Eigenschaften dieser Anordnung führen zu einer Selbstfokussierung der ebenen Schallwelle. Damit ergibt sich ein selbstfokussierender Druckwellengenerator, der extrem kompakt, einfach aufgebaut und von sehr hoher Lebensdauer ist. Ganz allgemein können mit der vorstehend beschriebenen Oberflächenstrukturierung jedoch auch beliebige anders erzeugte ebene oder auch gekrümmte Schallwellen in Reflexion fokussiert bzw. abge-

bildet werden.

Patentansprüche

- 5 1. Verfahren zur Erzeugung von Stoßwellen für technische, vorzugsweise medizintechnische, Anwendungen, insbesondere für die Lithotripsie und/oder die Schmerztherapie, wobei durch Druckpulsationen akustische Wellen vorgegebener Wellenlänge hoher Energiedichte erzeugt werden, wozu mit Hilfe eines intensiven elektrischen Impulses elektrische Energie in einem flüssigen Elektrolyten direkt und weitestgehend verlustfrei in mechanische Energie in Form von Druckpulsationen gewandelt wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß die elektrische Energie zur Aufheizung des leitfähigen, flüssigen Elektrolyten eingesetzt wird und somit die Druckpulsationen über eine kurzzeitige Aufheizung des Elektrolyten erzeugt werden, wobei die kurzzeitige Aufheizung als homogene Aufheizung in einer großflächigen und dünnen Flüssigkeitsschicht des Elektrolyten erfolgt.
- 10 2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß Stromdichte und elektrische Feldstärke innerhalb der Flüssigkeitsschicht über den Querschnitt der Anordnung weitestgehend konstant bleiben und die Dicke der Flüssigkeitsschicht kleiner als die zu erzeugende Wellenlänge, die Querabmessung jedoch groß im Vergleich zur zu erzeugenden Wellenlänge ist.
- 15 3. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Aufheizung des Elektrolyten skalierbare Volumina bzw. skalierbare Oberflächen simultan und homogen erfaßt werden.
- 20 4. Verfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Geometrie der Volumina bzw. Oberflächen an den Verwendungszweck angepaßt wird.
5. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Stromfluß im Elektrolyten senkrecht zur Schallausbreitungsrichtung erfolgt.
6. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Stromfluß in der Flüssigkeitsschicht parallel zur bevorzugten Schallausbreitungsrichtung und senkrecht zur Oberfläche der Flüssigkeitsschicht erfolgt.
- 25 7. Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 1 oder einem der Ansprüche 2 bis 6 mit einem flüssigen Elektrolyten und einem Leistungsimpulsgenerator zur Erzeugung von elektrischer Energie sowie Mitteln zum kurzzeitigen Einbringen der Energie in den Elektrolyten, gekennzeichnet durch eine Anordnung von zwei Elektroden (1, 2, 7, 8, 21, 22, 31), die den Elektrolyten (3) einschließen und vom Leistungsimpulsgenerator (5) angesteuert werden, wobei mindestens eine Elektrode (1, 2, 7, 8, 21, 22, 31) die Auskopplung von Schallwellen in ein Schallausbreitungsmedium (4) ermöglicht.
- 30 8. Vorrichtung nach Anspruch 7 zur Durchführung des Verfahrens nach Anspruch 2 und Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Flüssigkeitsschicht (3) an ihren schmalen Seiten von Elektroden (7, 8) begrenzt wird, die zur Stromeinkopplung benutzt werden, wobei die Auskopplung der entstehenden Schallwelle durch eine isolierende Membran (10) ermöglicht wird.
- 35 9. Vorrichtung nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß die Flüssigkeitsschicht (3) an ihren großflächigen Oberflächen von Elektroden (1, 2, 21, 22) begrenzt wird, die zur Stromeinkopplung benutzt werden und von denen mindestens eine die Auskopplung der entstehenden Schallwelle ermöglicht.
- 40 10. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Elektrodenanordnung eine erste feststehende massive Elektrode (1, 21, 31) und eine zweite dünne, leichte Elektrode (2, 22) im vorgegebenen Abstand von der ersten Elektrode (1, 21) enthält, wobei zwischen den Elektroden (1, 2, 21, 22) sich der Elektrolyt (3) vorgegebener Schichtdicke (9) befindet.
11. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Elektrodenanordnung eine erste feststehende massive Elektrode (1) und eine zweite Elektrode (2) im vorgegebenen Abstand von der ersten Elektrode (1) enthält, wobei die zweite Elektrode (2) aus einem Gitter hoher Transmission besteht.
- 45 12. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Elektroden (1, 2, 7, 8, 21, 22, 31) aus korrosionsbeständigen Materialien bestehen.
13. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß das Produkt aus Massendichte und Schallgeschwindigkeit der ersten Elektrode (1) deutlich größer ist als die diesbezüglichen Produkte des Elektrolyten (3) und des Schallausbreitungsmediums (4).
- 50 14. Vorrichtung nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß das Produkt aus Massendichte und Schallgeschwindigkeit des Elektrolyten (3) einerseits und des Schallausbreitungsmediums (4) andererseits in etwa gleich groß sind und dem von Wasser entsprechen.
15. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 14, dadurch gekennzeichnet, daß ebene Elektroden (1, 2) vorhanden sind, mit denen eine ebene Schallwellenfront erzeugt wird.
- 55 16. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß der Elektrodenanordnung (1, 2) eine akustische Linse nachgeschaltet ist.
17. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 15, dadurch gekennzeichnet, daß die schallharte Elektrode (1) eine Strukturierung (11, 111) der Oberfläche (100) aufweist.
- 60 18. Vorrichtung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Strukturierung in konzentrischen Ringen (11) besteht, deren Oberflächen (111) mit der Elektrodenfläche (100) einen vorgegebenen Winkel einschließen.
19. Vorrichtung nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, daß die Ringe (11) im Querschnitt jeweils eine Kegelform haben.
20. Vorrichtung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Oberflächen (111) der Ringe (11) Kegelmantelflächen bilden.
- 65 21. Vorrichtung nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, daß die Oberflächen (111) der Ringe konkav gekrümmte Rotationskörperoberflächen, wie beispielsweise Spheroideflächen, Ellipsoidflächen oder Paraboloidflächen, bilden.
22. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens eine, vorzugsweise jedoch zwei kon-

kav ausgebildete Elektroden (21, 22) vorhanden sind, mit denen eine gekrümmte Wellenfront erzeugt wird.

23. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 22, dadurch gekennzeichnet, daß der Leistungsimpulsgenerator (5) aus einem LC-Glied und einem elektronischen Schaltelement besteht.

24. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 23, dadurch gekennzeichnet, daß die elektrische Leitfähigkeit des Elektrolyten (3) so eingestellt wird, daß die Leistungsanpassung an den Leistungsimpulsgenerator (5) optimiert ist. 5

25. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 24, dadurch gekennzeichnet, daß Mittel zur Entgasung des Elektrolyten (3) vorgesehen sind.

26. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 25, dadurch gekennzeichnet, daß Mittel zur Feinfilterung des Elektrolyten (3) vorgesehen sind.

27. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 26, dadurch gekennzeichnet, daß als Elektrolyt (3) eine Flüssigkeit 10 verwendet wird, deren Wert $(\Delta V/V_0)/W$ möglichst groß ist, wobei $\Delta V/V_0$ die relative Volumenänderung pro eingetragener Energie W ist.

28. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 27, dadurch gekennzeichnet, daß der Elektrolyt (3) aus einfachen Alkoholen wie Ethanol oder Methanol mit ionenleitfähigen Zusätzen besteht.

29. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 27, dadurch gekennzeichnet, daß der Elektrolyt (3) aus höherwertigen Alkoholen, beispielsweise Ethylenglykol oder Glycerin mit ionenleitfähigen Zusätzen, besteht. 15

30. Vorrichtung nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Elektrodenform optimiert ist zur Erzeugung eines problemangepaßten, nicht punktförmigen Fokus.

31. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 7 bis 21 und 23 bis 30, dadurch gekennzeichnet, daß mindestens eine, vorzugsweise jedoch zwei konvex ausgebildete Elektroden vorhanden sind, mit denen eine gekrümmte divergierende Schallwellenfront erzeugt wird. 20

Hierzu 3 Seite(n) Zeichnungen

25

30

35

40

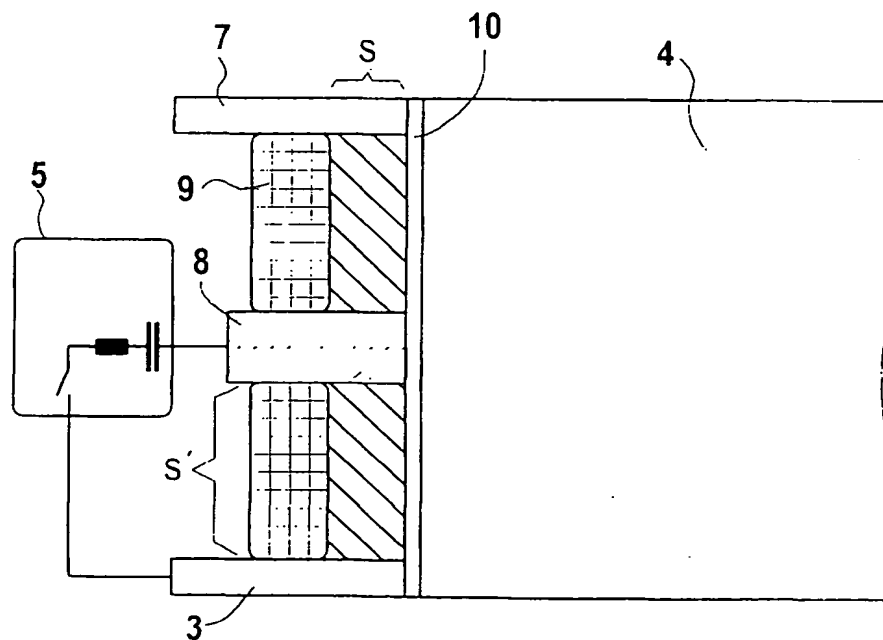
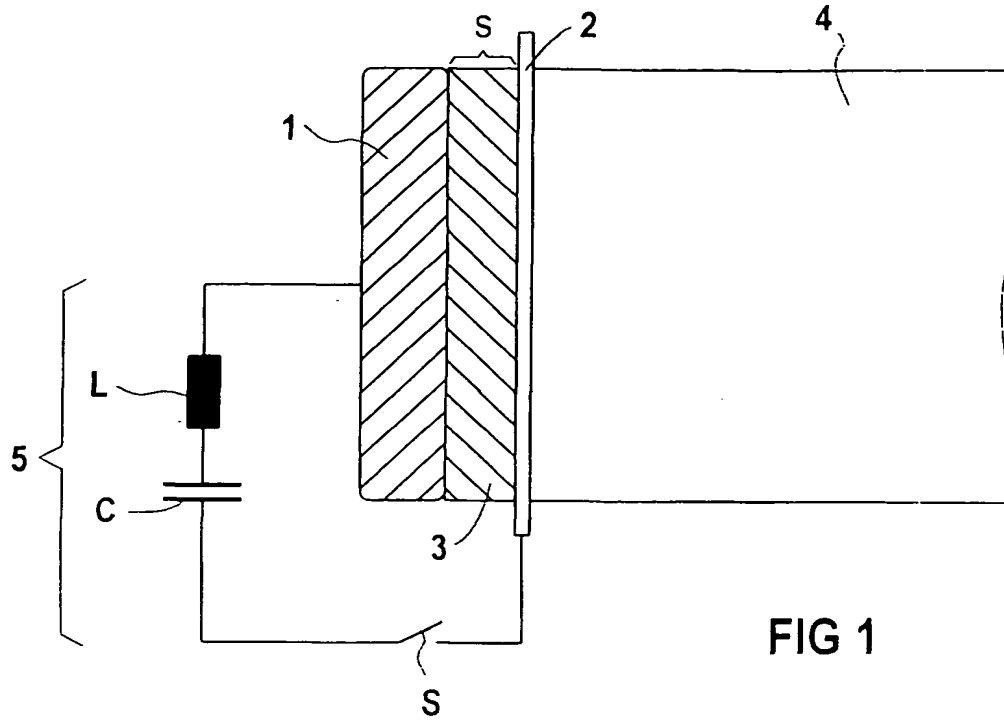
45

50

55

60

65



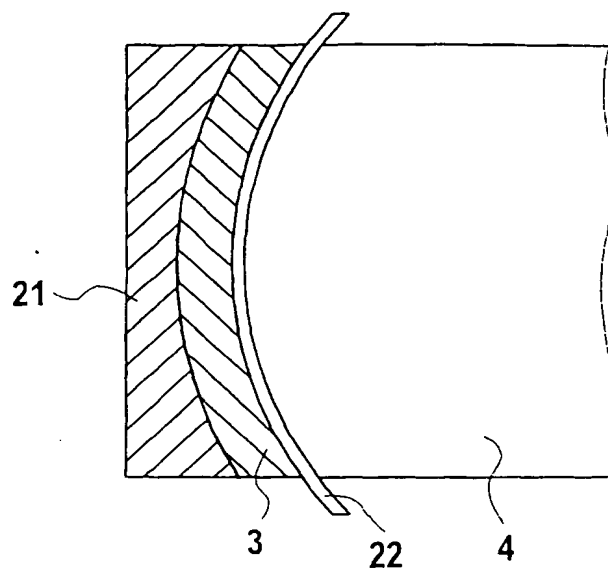


FIG 3

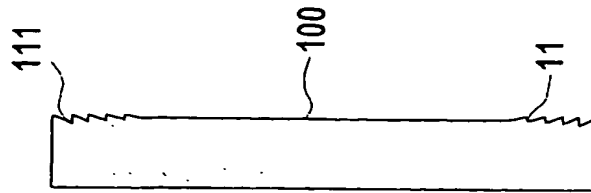


FIG 5

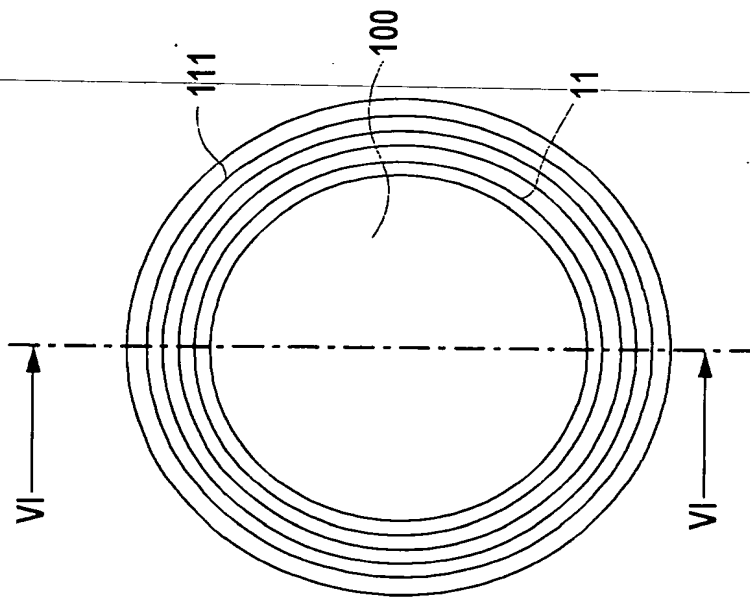


FIG 4